УДК 537.525

ФИЗИКА ПРОБОЯ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ (История и современное состояние, вклад советских и российских ученых)

В.Я. Ушаков

Томский политехнический университет
E-mail: rcr@tpu.ru

Дана краткая история развития учения об электрическом пробое диэлектрических жидкостей, совершенствования техники и методики исследования этого явления. Показано, что по целому ряду направлений советские (российские) ученые и, в частности, сотрудники Томского политехнического университета опережали зарубежных коллег и внесли определяющий вклад в понимание механизмов пробоя жидкостей. Представлены современные физические модели инициирования и развития разряда при импульсном воздействии напряжения.

1. Историческая справка

История учения о пробое диэлектрических жидкостей насчитывает более полутора столетий, но подлинный интерес к этому явлению пробудился в начале XX века в связи с развитием практической электротехники и электроэнергетики. Шло накопление данных об электрической прочности жидкостей (прежде всего, минеральных масел) и её зависимости от различных факторов: свойств и состояния жидкости, геометрии разрядного промежутка и свойств материала электродов, параметров напряжения. Одновременно изучались природа и свойства жидкостей, выполнялись некоторые количественные измерения (напряжение, ток, заряд, световая эмиссия) и визуальные наблюдения для установления механизма пробоя жидкостей.

Определились два принципиально различных подхода к явлению электрического пробоя жидкостей. Согласно одному из них, электрический пробой жидкостей фактически является разрядом в газовых пузырьках (полостях), которые присутствуют в жидкостях и на электродах до приложения поля и образуются при протекании тока за счет вскипания, электролиза, кавитации и др. В современной терминологии такой пробой называется "пузырьковым".

Сторонники иного подхода разряд в жидкости рассматривают как следствие лавинообразного размножения свободных носителей заряда в самой жидкости под действием сильного поля и используют модель, которая, по существу, является моделью газового разряда, распространенной на жидкую фазу вещества. Этот механизм пробоя стали называть "ионизационным" или собственно электрическим. К 70-м годам прошлого столетия были опубликованы несколько десятков моделей (качественных и количественных) как пузырькового, так и ионизационного пробоя жидкостей [1–3]. Следует назвать два принципиальных недостатка этих моделей.

Во-первых, практически все они являются критериальными, т.е. ориентированы на вычисление некоторой критической разности потенциалов между электродами или критической напряженности поля, при которых нарушается равновесие системы и которые принимаются за пробивные. Из всего многообразия процессов, ответственных за формирование пробоя, выбираются один-два (например, разогрев и вскипание жидкости, эмиссия электронов из катода, взаимодействие ускоряющихся электронов с коллективом молекул жидкости и др.), а спонтанное нарастание их интенсивности принимается за выполнение условия пробоя. Процессы, участвующие в формировании пробоя, не рассматривались в их временной и пространственной последовательности.

Во-вторых, многие параметры критериальных уравнений не поддаются точному определению и оказываются весьма чувствительными к трудно контролируемому состоянию жидкости и электродов.

История физики газового разряда, развивающейся со значительным опережением, показывает, что достоверная теория пробоя может быть создана лишь на основе детальной физической картины явления, включающей описание развития всех фаз разряда в их временной и пространственной последовательности.

Впервые описание развития пробоя в жидкостях (трансформаторное масло и дистиллированная вода) на основании скоростной фотографической регистрации канала разряда и синхронного с ней осциллографирования тока и напряжения дал В.С. Комельков [4, 5]. Позднее T.W. Liao и I.G. Anderson [6, 7] выполнили аналогичные исследования развития разряда в объеме трансформаторного масла и по поверхности твердого диэлектрика, погруженного в масло.

Было показано, что пробой длинных разрядных промежутков с неоднородным полем осуществляется процессом, имеющим сходство с многостадийным толчкообразным лидерным процессом в длинных воздушных промежутках, включая молнию.

Первые экспериментальные исследования разряда в жидкостях с применением методов скоростной фотографии со всей очевидностью показали перспективность такого методического приема. Однако техническое несовершенство имеющихся в то время фотокамер с механической разверткой (малое временное разрешение и низкая оптическая чувствительность) не позволяло развивать это направление исследований.

Во второй половине XX столетия, как и в его начале, наблюдался резкий рост интереса к явлению импульсного электрического пробоя жидкостей в связи с бурным развитием мощной высоковольтной техники (Pulsed Power). Высоковольтные микро- и наносекундные импульсы находят всё более широкое применение в военной технике, в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу, в электроразрядных технологиях и др. Исключительно высокие значения параметров импульсов предъявляют ряд жестких требований к изолирующей среде в основных элементах генераторов импульсов – в накопителях и коммутаторах. Как показал опыт, в наибольшей мере этим требованиям отвечают жидкие диэлектрики – деионизованная вода, минеральные масла, смеси на основе спирта и глицерина.

В начале семидесятых годов появилась возможность применять для исследования пробоя жидкостей приборы скоростной фотографии на базе электронно-оптических преобразователей с временным разрешением до 10^{-12} с и с усилением по свету до 10^6, а также методы и приемы наносекундной техники, высокоскоростной осциллографии и др.

Первые исследования электрического пробоя жидкостей с использованием электронно-оптических преобразователей были выполнены в 1962–1964 гг. автором данной статьи в лаборатории высоковольтного газового разряда и молниезащиты ЭНИН им. Г.М. Кржижановского [8, 9], позже они были продолжены в Томском политехническом институте. Исследованы основные закономерности инициирования и развития пробоя жидкостей в широком интервале изменения длительности импульса и длины разрядного промежутка, перекрывающем диапазон изменения этих параметров в реальных импульсных высоковольтных установках.

Была составлена детальная пространственно-временная картина развития пробоя жидкостей в длинных промежутках с неоднородным полем. Результаты этих исследований и исследований, выполненных до 1970–73 гг. в ведущих отечественных и зарубежных лабораториях, были обобщены в монографии [3].

В последующие 30 лет в СССР (позднее в России), Франции, США, Великобритании, Норвегии, Японии, Польше, Индии, Китае и в некоторых других странах исследования проводимости и пробоя жидкостей характеризуются не только широким фронтом работ, но и использованием самой передовой экспериментальной техники. Советские (российские) группы исследователей часто опережали своих зарубежных коллег в значительной мере благодаря сложившейся тесной кооперации ученых разных научных направлений при решении научно-технических проблем государственной важности (системы вооружений на новых принципах, управляемый термоядерный синтез и др.). Самые современные приборы и экспериментальные методики оказывались доступными специалистам, работающим в области физики пробоя жидкостей. Многие экспериментальные методики были разработаны и самими "пробойщиками". В нашей стране наибольший вклад в изучение механизмов пробоя жидкостей внесли группы исследователей из НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете (В.Я. Ушаков, В.В. Лопатин), СибНИИ энергетики (Ю.Н. Вершинин, Э.В. Яншин), Новосибирского государственного технического университета (В.Ф. Климкин), Санкт-Петербургского государственного технического университета (Г.С. Кучинский, Е.А. Морозов), Института ядерной физики СО РАН (Д.Д. Рютов, В.М. Логунов), института прикладной механики СО РАН (А.Г. Пономаренко), Всероссийского электротехнического института (Ю.В. Торшин), института гидродинамики СО РАН (А.Л. Куперштох). (Названы фамилии только руководителей работ).

Материалы, полученные с помощью более совершенной экспериментальной техники, позволили вновь обратиться к комплексному рассмотрению природы электрического пробоя жидкостей на новом, более высоком уровне. Сделано это в монографии [10].

2. Аппаратура и методики исследований

Прогресс в понимании механизмов электрического разряда в жидкостях достигнут в значительной мере благодаря применению лазерной техники. Объясняется это тем, что сочетание лазерных источников света с оптическими методами (шлирен-методы, интерферометрия и др.) позволяет удовлетворить требованиям высокого временного и пространственного разрешения, что особенно важно при изучении начальных стадий разряда. Следует отметить, что высокое временное разрешение, обеспечиваемое электронно-оптическими преоб-

разователями, сопровождается ухудшением качества изображения при наносекундных экспозициях. Это ограничивает возможности их применения при изучении микрообъектов, изменяющихся с большими скоростями.

В СССР первые исследования физической картины электрического разряда в жидкостях с использованием рубинового лазера в качестве источника подсветки в схеме высокоскоростного шлирен-фотографирования были выполнены в 1970–1971 гг. в институте ядерной физики СО РАН (ИЯФ СО РАН), [11, 12]. Это позволило выявить некоторые важные детали зарождения и развития разряда в воде. Полученные результаты показали перспективность данного направления исследований, которое получило интенсивное развитие в последующие годы. Применение многокадровых систем позволяет более надежно изучать динамику процессов. Дальнейшее развитие нового экспериментального подхода к исследованию механизма электрического разряда в жидкостях связано с совершенствованием методов и техники сверхскоростной оптической регистрации.

Особенности электрического разряда в жидкостях (многообразие и сложность явлений, малые характерные размеры ≤10 мкм, высокие скорости развития ~10^5...10^7 см/с) позволяют выделить ряд требований, предъявляемых к методам высокоскоростных оптических измерений: 1) длительность импульсов подсветки не более ~10...0,1 нс; 2) частота съемки в кадровом режиме ~10^9...10^8 кадров/с; 3) изменение интервала между кадрами в широком диапазоне (~1...100 нс); 4) высокая точность синхронизации кадров, а желательное число кадров не менее 4–7; 5) энергия светового пучка должна быть достаточной для получения последующих кадров с соответствующей задержкой; 6) высокое качество пучка для получения надежных количественных данных. Схемы многокадрового фотографирования, основанные на линиях световой задержки с лазерным источником освещения, разработаны и применялись в институте прикладной механики СО РАН и Новосибирском государственном университете [13, 14].

В начале 80-х годов в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете были разработаны интерференционные и теневые методы лазерной диагностики явлений, связанных с изменением комплексного показателя преломления исследуемой среды, включая создание алгоритмов восстановления профиля диэлектрической проницаемости возмущенной среды по амплитуде и фазе диагностической волны с учетом дифракции, рефракции и поглощения. Был создан диагностический комплекс включающий:

– лазер с активной синхронизацией мод, обеспечивающий следующие параметры единичного импульса: длительность 1 нс, энергия 40 мДж, длина волны 0,69 мкм, нестабильность появления импульса срабатывания разрядника <1 нс;
– систему синхронизации, позволяющую производить зондирование промежутка в диапазоне 0,1...10000 мкс относительно начала высоковольтного импульса;
– двухкадровую систему с пространственным разделением зондирующих пучков;
– двухкадровую однаракурсную систему с поляризационным разделением пучков;
– интерферометр Саньяка с треугольным ходом лучей, расположенным вне объекта исследования [15].

Примерно в это же время две другие группы исследователей – в Сибирском НИИ энергетики (г. Новосибирск) [16, 17] и в Санкт-Петербургском государственном техническом университете [18] разработали и применили для исследования предпробивных и пробивных процессов в жидкости оптические методики регистрации динамики перераспределения электрического поля и (или) изменения плотности жидкости на основе эффекта Керра.

В [18] применен лазерный интерферометр Маха-Цендера со схемой регистрации интерференционных картин в режиме фотохронографии на электронно-оптическом фотохронографе. Последнее обеспечивало возможность регистрации кратковременных явлений в том числе и в наносекундном диапазоне длительностей высоковольтных импульсов.

3. Физические механизмы инициирования (зажигания) разряда

Большой экспериментальный материал по электрическому пробою жидкостей, накопленный к настоящему времени, подтверждает сделанный ранее вывод о том, что существует несколько различных механизмов пробоя, описать которые единой теорией принципиально невозможно.

Для стадии зажигания разряда можно выделить, как минимум, четыре различных механизма инициирования разряда: 1) *пузырьковый*, 2) *микровзрывной*, 3) *ионизационный*, 4) *электротепловой*.

Решающую роль в *пузырьковом* зажигании разряда играет газ, который существовал на электродах и в жидкости до приложения поля.

В модели [19, 20] принято, что пузырьки размером от единиц до десятков микрон существуют в жидкости, преимущественно на электродах. Под действием электрического поля после достижения на пузырьке падения напряжения Up в нем возникают ионизационные процессы (частичные разряды). После разряда поле в пузырьке уменьшается вследствие экранирования осевшими зарядами внешнего поля, что вызывает ослабление либо прекращение ионизационных процессов. Действие электрического поля на осевший заряд приводит к вытягиванию пузырька вдоль поля, а также к продвижению заряда вглубь жидкости со скоростью, определяемой подвижностью носителей заряда. При этом возможны две ситуации: поддержание

разряда в виде "тлеющего разряда" либо прекращение разряда.

В первом случае на пузырьке поддерживается напряжение, по-видимому, соответствующее закону Пашена. В последнем случае напряжение на пузырьке растет, что ведет к повторному разряду и движению в жидкости новой волны зарядов. Определяющий параметр – давление на стенку пузырька – обусловлен действием кулоновских сил на инжектированный и поверхностный заряды и ростом давления в пузырьке за счет нагрева газа в нем. Зажигание разряда в жидкости произойдет тогда, когда напряженность поля в жидкости вблизи полюса пузырька достигнет критического значения.

Поскольку деформация зависит от внешних условий, свойств жидкости и границы раздела, то в модели проявляется явная зависимость и импульсной электрической прочности от этих параметров. В модели имеется также возможность учета параметров импульса напряжения, (крутизны фронта импульса), типа и формы электродов. Дальнейшее совершенствование модели возможно при учете статистики пузырьков, что приведет к учету влияния технологии на $E_{пр}$, а также к более корректному учету размеров электродов ("эффекта площади").

Этот механизм инициирования с наибольшей вероятностью реализуется в недегазированных жидкостях при длительности воздействия напряжения от единиц до сотен микросекунд.

При *микровзрывном* инициировании разряда события развиваются в следующей последовательности: эмиссия электронов в жидкость (разряд с катода) или ионизация молекул жидкости (разряд с анода) – быстрый локальный разогрев жидкости током, переносимым наведенными носителями заряда, – формирование и движение ударной волны – взрывное парообразование за фронтом ударной волны – ионизация газо-паровых пузырьков – зарождение плазменного канала.

Количественная оценка процессов, связанных с локальным перегревом жидкости ионизационными токами для объяснения механизма зажигания электрического разряда с анода, предпринята В.Ф. Климкиным [21]. Физическая модель катодного микровзрывного инициирования разряда с хорошо обоснованными количественными оценками применительно к воде и сжиженным благородным газам при воздействии на них импульсов напряжения субмикросекундной длительности развита в серии работ H.M. Jones, E.E. Kunhardt [20, 23].

В данной модели процесс рассматривается четырехстадийным:

1. вблизи катода образуется область спонтанного образования газовых зародышей. Необходимая для этого плотность энергии составляет для воды – 10^9 Дж/м^3, для сжиженного аргона – 10^8 Дж/м^3;
2. рост и расширение этой области до такой степени, при которой плотность вещества уменьшается до величины, достаточной для развития ударной ионизации; размер области должен быть не меньше, чем расстояние, необходимое для развития лавины критического размера;
3. рост электронной лавины и ее трансформация в ионизированный фронт;
4. продвижение фронта благодаря названным выше трем процессам, но происходящим в области впереди ионизированного фронта.

Модель зажигания и развития разряда основана на предложении о том, что коэффициент ударной ионизации α равен 0 при $E=E_{пр}$ и на экспериментально установленных зависимостях времени пробоя $\tau_{пр}$ от гидростатического давления над жидкостью P, удельной электропроводности γ и межэлектродного расстояния d.

Поскольку, согласно экспериментальным данным, при субмикросекундных экспозициях напряжения низковольтная проводимость жидкостей практически не влияет на пробивные характеристики, принято, что роль ионного тока пренебрежимо мала. Решающая роль в энерговыделении и образовании зародышей газовой фазы отводится автоэмиссии электронов с катода.

Основным условием реализации микровзрывного механизма инициирования является высокая напряженность поля в приэлектродной области, которая достижима при наносекундных длительностях импульса напряжения. Благоприятными факторами для проявления такого механизма инициирования являются также малый радиус закругления инициирующего электрода (единицы – десятки микрон) и малые межэлектродные расстояния (субмиллиметровые).

Ионизационный механизм инициирования – зарождение плазменного канала как непосредственное следствие ионизации молекул жидкости за счет автоионизации (анодное инициирование) или ударной ионизации (катодное инициирование). Энерговыделение, фазовый переход первого рода, формирование ударных волн в этом случае являются вторичными процессами.

Для его реализации условия должны быть еще более "жесткие", чем в предыдущем случае – предельно высокие напряженности поля (порядка 10^8 В/см) и очень малые длительности импульса напряжения (10^{-8} с и менее). При этом напряженности поля достаточны для ионизации молекул жидкости, но времени недостаточно для фазового перехода первого рода.

Важную роль в ионизации жидкости может играть генерация интенсивных локальных электрических полей из-за структурных флуктуаций внутри диэлектрика. В [24, 25] предложена флуктуационная модель пробоя жидких диэлектриков. Процесс зарождения и роста разрядных каналов приближенно описывается критерием типа порогового. Если локальное поле (зависит от потенциала и радиуса микроострия головки канала)

$$E_{лок} > E_{*} + \delta,$$

то в этом месте возникает новый участок проводящей фазы. Здесь E_* – характеристика вещества, физический смысл которой есть пороговое поле пробоя идеального диэлектрика, а δ – случайные флуктуации этой величины, возникающие вследствие многих причин. Одной из них является то, что поле, действующее на поляризуемую молекулу в жидкости, изменяется по величине и направлению из-за тепловых флуктуаций в положении соседних поляризованных частиц. С другой стороны, состояния колебательных степеней свободы и электронных конфигураций с некоторой вероятностью являются возбужденными из-за взаимодействия молекул между собой в процессе их теплового движения. Поэтому существует заметная вероятность ионизации молекул в электрическом поле на дальнем крыле больцмановского распределения. Оказывают также влияние неоднородности диэлектрика в пространстве. Определяющую роль играют отрицательные значения флуктуаций δ.

Зажигание заряда по микровзрывному и ионизационному механизмам, реализуемым в сильно перенапряженных промежутках, сопровождается плавлением и даже сублимацией металла острийных электродов с малыми r_0 и микроострий на поверхности электродов с большой площадью "напряженной" поверхности [26, 27]. Наиболее достоверные количественные данные об этом явлении удалось получить для острийных электродов с малыми углами конуса (8...30°) и радиусами вершины (1...10 мкм). В зависимости от экспериментальных условий (геометрия электрода, вид жидкости, напряженность поля) масса металла, уносимого с острийного электрода за один, прерванный разряд лежит в пределах ~$10^{-10}...10^{-5}$ г. Часть его переносится на противоположный электрод (в миллиметровых и субмиллиметровых промежутках).

Под *электротепловым* механизмом инициирования разряда будем подразумевать следующую совокупность явлений: протекание под действием приложенного поля тока высоковольтной проводимости – разогрев жидкости в приэлектродных областях с максимальной напряженностью поля - вскипание жидкости – ионизация паро-газовых полостей – формирование зачатка плазменного канала. Этот механизм может реализовываться при больших значениях произведения удельной электропроводности жидкости (γ) на длительность воздействия напряжения (τ). Поскольку при импульсных воздействиях напряжения τ обычно не превосходит нескольких сотен микросекунд, то такой механизм инициирования наиболее вероятен в жидкостях с большой γ – прежде всего в электролитах.

4. Механизмы развития разряда и границы их реализации

Для стадии развития разряда существенно различными можно считать три механизма (три вида разряда): 1) "быстрый" (сверхзвуковой), 2) "медленный" (дозвуковой) и 3) "электротепловой". В первом случае пробой жидкостей обычно называют "ионизационным", во втором – "пузырьковым", хотя в обоих случаях первоначальное нарушение (изменение) фазового состояния жидкости происходит за счет движения носителей заряда в самой жидкости, образующихся вследствие ионизации (разряд с анода) или эмиссии и ионизации (разряд с катода), а образование плазменного канала обусловлено ионизацией в газовой фазе. Их особенности обусловлены различием в интенсивности и последовательности процессов, обеспечивающих приращение длины плазменного канала, зародившегося на стадии зажигания.

В тех случаях (достаточно редких для импульсного пробоя жидкостей), когда реализуется электротепловой механизм инициирования, пробой включает: разогрев жидкости (преимущественно ионными токами), вскипание жидкости с образованием газо-паровых полостей, ионизацию в полости. Разрядный канал удлиняется за счет движения к противоположному электроду области локального разогрева и вскипания жидкости.

Первые два вида разряда зависят от полярности инициирующего электрода, хотя и в несколько меньшей степени, чем стадия зажигания разряда.

Наиболее отчетливо ионизационный механизм пробоя проявляется в виде развития быстрых каналов с анода, пузырьковый – в виде развития медленных каналов с катода. Следует иметь в виду, что в одном акте электрического пробоя могут наблюдаться и медленные, и быстрые каналы. Как правило, первые преобразуются во вторые. Однако, в определенных условиях (например, при развитии разряда на хвосте импульса, когда разность потенциалов на электродах в период развития разряда быстро падает), последовательность событий может быть противоположной.

Физическая картина распространения *быстрого положительного* канала при этом такова. Ионизационные процессы развиваются в жидкости благодаря высокой напряженности поля вблизи головки разрядного канала. Электроны образуются перед головкой вследствие автоионизации и движутся к ней под действием ее поля. Они входят в положительно заряженную головку канала и оставляют позади новую область положительного пространственного заряда. Образование и движение в сильном электрическом поле носителей заряда обеспечивает интенсивное выделение тепловой энергии. Последнее переводит жидкость в сверхкритическое состояние, сопровождающееся практически мгновенным образованием зародышей газовой фазы высокого давления и температуры. За этим следует быстрое (сверхзвуковое) расширение, сопровождающееся формированием ударной волны, снижением температуры и давления и образованием газового канала. Расширение ствола канала происходит с малой (дозвуковой) скоростью $\approx 10^3...10^4$ см/с. Основным механизмом удлинения первичного канала является не движение границы газ-жидкость, а постоянное создание такой границы.

После зажигания разряда *на катоде* эмиссия электронов в жидкость осуществляется не из металла, а из плазмы зародившегося разрядного канала. Плотность энергии, выделяемой перед головкой развивающегося канала, и, соответственно, скорость его удлинения зависят от электропроводности канала, обеспечивающего гальваническую связь области ионизации с электродом. Это означает, что время локального разогрева жидкости и скорость удлинения канала зависят от динамики канала.

Целый ряд экспериментальных данных – пузырьковая структура разряд каналов, генерация ударных волн в процессе продвижения каналов, дозвуковая скорость развития каналов, сильная зависимость разрядных процессов от внешнего давления и независимость от электронных свойств жидкости – показывают определяющую роль в инициировании и развитии разряда образования парогазовой фазы. Энергетический анализ процессов в разрядном промежутке показывает, что процессы газообразования и последующая ионизация газовых пузырьков является вполне реализуемыми при определенном сочетании напряженности поля и длительности воздействия напряжения.

В созданных на сегодня моделях ионизационного и пузырькового механизмов пробоя не учитывается роль фотоионизации за счет излучения канала. Объясняется это, прежде всего, тем, что в большинстве экспериментальных условий скорость продвижения канала не превосходит дрейфовую скорость электронов в жидкости, т.е. ~10^7 см/с. Однако в очень длинных промежутках в трансформаторном масле при U=1...10 МВ в [28, 29] зарегистрированы скорости ~$2\cdot10^8$ см/с. Близкие скорости наблюдаются и на финальной стадии разряда при меньших межэлектродных расстояниях и напряжениях [9] .

В области микросекундных длительностей импульсов и в длинных разрядных промежутках (миллиметры и более) рассмотренные выше разрядные каналы являются лишь первой стадией *двухстадийного лидерного процесса*. При его описании эти каналы названы *первичными*.

Первичные каналы диаметров в единицы микрон развиваются непрерывно (возможно, квазинепрерывно) со скоростью 10^5...10^7 см/с. Их развитие сопровождается протеканием тока ~10^{-4}...10^{-3} А; плотность тока при этом составляет (1...8)$\cdot10^3$ А/см^2 (по данным [3]) или 1,5$\cdot10^2$ А/см (по данным [20, 31]), средние продольные градиенты потенциала – (1,5...3,0)$\cdot10^4$ В/см, удельная проводимость вещества первичного канала – 0,1...0,8 Ом$^{-1}$см$^{-1}$ (по данным [3]) или 1,3$\cdot10^2$ Ом$^{-1}$см$^{-1}$ (по данным [20, 31]). В процессе развития первичного канала в его основании создаются некоторые критические условия, приводящие к ударному расширению канала со скоростью (1...6)$\cdot10^5$ см/с до 50...120 мкм, увеличению тока на 3–4 порядка, яркой вспышке канала. Преобразование первичного канала, представляющее собой вторую стадию лидерного процесса, от основания первичного канала распространяется к его головке со скоростью (1...3)$\cdot10^7$ см/с. Этим заканчивается первая ступень толчкообразного развития лидерного канала, с продольными градиентами потенциала 2...11 кВ/см и удельной проводимостью вещества 2...10 Ом$^{-1}$см$^{-1}$ (по данным [3]) или 10^2 Ом$^{-1}$см$^{-1}$ (по данным [30, 31]). В последующем первичный канал развивается с головки лидерного канала, и его преобразование в лидерный осуществляется аналогично описанному. Скорость развития первичного канала, паузы между толчками лидера и, следовательно, эффективная скорость удлинения лидерного канала зависят от свойств жидкости, параметров импульса напряжения, конфигурации поля в разрядном промежутке.

Очевидно, что теоретическое описание этого процесса и, следовательно, теория импульсного пробоя жидкостей в умеренно коротких промежутках должна включать описание таких последовательных стадий разряда, как: 1) зажигание разряда, 2) развитие первичного канала, 3) преобразование первичного канала в лидерный, обеспечивающее вынос потенциала высоковольтного электрода в глубь промежутка.

5. Заключение

Подведя итог краткого обобщения экспериментальных и теоретических работ, посвященных инициированию (зажиганию) и развитию разряда в жидкостях, приходится констатировать, что, несмотря на значительный прогресс, достигнутый в понимании механизмов пробоя за последние десятилетия, некоторые фрагменты этого сложного явления остаются "белыми пятнами".

Наиболее сложными для количественного (и даже качественного) описания являются процессы в головке развивающегося разрядного канала и в переходной области между ней и газоразрядной плазмой, заполняющей ствол канала. Именно эти процессы обеспечивают преобразование жидкой диэлектрической среды в плазму.

Уместно отметить, что и при электрическом пробое других диэлектрических сред – газов и твердых диэлектриков – эти процессы признаются наиболее сложными для изучения и наименее понятными.

В частности, в [32] применительно к лидерному разряду в воздухе отмечается, что "Стримерно-лидерный переход – наиболее трудный для теории, наименее изученный, во многом даже не понятый до конца и вместе с тем один из наиболее важных этапов лидерного процесса". Под стримерно-лидерным переходом подразумевают зарождение лидера около электрода в стебле начальной вспышки импульсной короны, а также образование нового участка лидера из стримеров его стримерной зоны. Согласно [32] в течение паузы длительностью ~10 мкс между вспышкой первичной короны и появлением зачатка лидерного канала плотность плазмы в стебле короны падает примерно на два порядка (до ~10^{12} см$^{-3}$). "При столь низкой плотности нарастающее в ходе

подъема напряжения поле проникает во внутренний объем стебля. В результате по стеблю проходит вторичная волна ионизации, рождающая лидер". Показано, что "процессы первоначального зарождения лидера и последующего воспроизведения канала в лидерной головке протекают более или менее одинаковым образом".

Применительно к разрядному процессу в длинных промежутках в жидкостях примерно такой же подход был нами развит в [3]. Модель преобразования первичного канала в лидерный основана на предположении о решающей роли повышения градиента потенциала в первичном канале вследствие рекомбинации носителей заряда до величины, достаточной для развития интенсивной ударной ионизации в слабо ионизированном газовом канале, каковым является первичный канал.

В физике пробоя твердых диэлектриков многие десятилетия основные усилия были сосредоточены на определении критерия нарастающей ударной ионизации валентной зоны, который отождествлялся с условием пробоя. Современные достижения в области физики твердого тела, данные о простанственно-временных закономерностях развития разряда в твердых оптически прозрачных диэлектриках позволили Ю.Н. Вершинину [33] развить иной подход к описанию пробоя твердых диэлектриков. Распространение каналов разряда в нем связано с возникновением и перемещением в твердом диэлектрике фазовых переходов 1-го уровня. При разряде с катода это переход "твердое тело – расплав", а при разряде с анода – "твердое тело – плотная плазма". Катодный разряд с дозвуковой скоростью ассоциируется с электронно-тепловыми процессами, а сверхзвуковой анодный разряд – с электронно-детонационными процессами. При расчете этих процессов автор обращался к другим областям науки и использовал сведения из квантовой механики, электрохимии расплавов, теории детонации, физики твердого тела и неидеальной плотной плазмы и др.

Такой подход позволил Ю.Н. Вершинину [33] получить аналитические соотношения, связывающие индивидуальные свойства твердого диэлектрика и параметры импульса высокого напряжения с простанственно-временными характеристиками разряда.

Нам представляется, что развитый в [33] подход может оказаться чрезвычайно полезным для описания фазовых переходов и, в конечном итоге, формирования и развития разрядного канала в жидкости. Основанием для этого являются далеко идущие аналогии в закономерностях развития разряда в этих средах, что подчеркивалось многими авторами, в том числе нами [34].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.-Л.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958. – 907 с.
2. Балыгин И.Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков. – Л.: Энергия, 1964. – 227 с.
3. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1975. – 256 с.
4. Комельков В.С. Механизм импульсного пробоя жидкостей // Доклады АН СССР. – 1945. – Т. 47. – № 4. – С. 269–272.
5. Комельков В.С. Развитие импульсного разряда в жидкости // ЖТФ. – 1961. – Т. 31. – № 8. – С. 948–960.
6. Liao T.W., Anderson I.G. Propagation mechanism of impulse corona and breakdown in oil // AIEE Trans. – 1953. – V. 72. – № 1. – P. 641–648.
7. Anderson I.G., Liao T.W. The propagation mechanism of impulse creepage discharges over oil immersed surfaces // AIEE Trans. – 1955. – № 1. – P. 74.
8. Ушаков В.Я. Оптические и осциллографические исследования импульсного разряда в жидкостях. Дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТПИ, 1965.
9. Стекольников И.С., Ушаков В.Я. Исследование разрядных явлений в жидкостях // ЖТФ. – 1965. – Т. 35. – № 9. – С. 1692–1700.
10. Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении / Под ред. В.Я. Ушакова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 495 с.
11. Алхимов А.П., Воробьев В.В., Климкин В.Ф. и др. О развитии электрического разряда в воде // Доклады АН СССР. – 1970. – Т. 194. – № 5. – С. 1052–1054.
12. Абрамян Е.А., Корнилов В.А., Лагунов В.М. и др. Мегавольтный уплотнитель энергии // Доклады АН СССР. – 1971. – Т. 201. – № 1. – С. 56–59.
13. Климкин В.Ф., Пономаренко А.Г. Исследование импульсного электрического пробоя жидкостей с помощью оптической интерферометрии // ЖТФ. – 1979. – Т. 49. – № 9. – С. 1896–1904.
14. Климкин В.Ф. Многокадровая сверхскоростная лазерная шлирен-система для наблюдения предпробивных явлений в жидкостях в наносекундном диапазоне // ЖТФ. – 1991. – Т. 61. – № 9. – С. 15–19.
15. Кухта В.Р., Лопатин В.В., Петров П.Г. Восстановление профиля диэлектрической проницаемости симметричных микрообъектов по интерферометрическим данным // Оптика и спектроскопия. – 1984. – Т. 56. – № 1. – С. 179–181; Установка для исследования начальной стадии электрического разряда в диэлектриках // Электронная обработка материалов. – 1986. – № 3. – С. 66–68.
16. Овчинников И.Т., Яншин К.В., Яншин Э.В. Исследование распределения электрических полей в воде с помощью эффекта Керра // ЖТФ. – 1974. – Т. 44. – № 2. – С. 472–474; Экспериментальные исследования импульсных электрических полей в воде вблизи острийного электрода с помощью эффекта Керра // ЖТФ. – 1978. – Т. 48. – № 2. – С. 2596–2598.
17. Коробейников С.М., Яншин К.В., Яншин Э.В. Исследование предпробивных полей в нитробензоле с помощью эффекта Керра // Физика диэлектриков и новые области их применения: Тез. Всес. конф. – Караганда. – 10–12 июня 1978. – Сер. 2. – С. 18–19.
18. Кучинский Г.С., Морозов Е.А. Исследование физических явлений в воде в предразрядных электрических полях // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8. – № 24. – С. 1526–1531; Регистрация электрических полей в жидких диэлектриках на интерферометре Маха-Цандера с помощью эффекта Керра // ЖТФ. – 1983. – Т. 53. – № 6. – С. 1215–1220.
19. Korobeynikov S.M., Yanshin E.V. // Model of prebreakdown processes in liquid dielectrics under pulse voltage. Conf. Record 9th

Int. Conf. on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids. – Salford, GB, 1987.

20. Коробейников С.М. О роли пузырьков в электрическом пробое жидкостей. 1. Предпробивные процессы // Теплофизика высоких температур. – 1998. – № 3. – С. 362–367.
21. Klimkin V.F. Bubble generation model for initiating breakdown from anode in n-hexane with quasi-uniform electrical fields // Proc. 13th Intern. Conf. on Dielectric Liquids. – Nara, Japan, 1999. – P. 199–202.
22. Jones H.M., Kunhardt E.E. Nanosecond Pre-Breakdown and Breakdown Phenomena in Water: Influence of Pressure, Conductivity and Ionic Sheath Formation // Proc. 12th Intern. Confer. on Diel. Liquids, Roma, Italy, July 15–19, 1996. – P. 360–364.
23. Jones H.M., Kunhart E.E. Evolution of Cathode Initiated Pulsed Dielectric Breakdown in Polar and Nonpolar Liquids // Proc. 12th Intern. Conf. on Diel. Liquids, Roma, Italy, July 15–19, 1996. – P. 365–368.
24. Куперштох А.Л. Флуктуационная модель пробоя жидких диэлектриков // Письма в ЖТФ. – 1992. – Т. 18. – № 19. – С. 91–96.
25. Kupershtokh A.L. Propagation of streamer top between electrodes for fluctuation model of liquid dielectrics breakdown // Proc. 12th Intern. Conf. on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids. – Roma, Italy, 1996. – P. 210–213.
26. Муратов В.М., Ушаков В.Я. Явления на электродах при импульсном пробое электролитов в микронных промежутках: В кн.: "Техника высоких напряжений". – Томск: Изд-во ТГУ, 1973. – С. 31–33.
27. Лопатин В.В., Ушаков В.Я., Черненко В.П. Зажигание и развитие наносекундного разряда в жидкостях // Известия вузов. Физика. – 1975. – № 3. – С. 99–106.
28. Watkins M.L., Budenstein P.P. // Ann. Rep. CEIDP. – NAS-NRC. – Washington, DC, 1988. – P. 256.
29. Stricklett K.L., Fenimore C., Kelley E.F. et al. Observation of partial discharge in hexane under high magnification // IEEE Trans. EI. – 1991. – V. 26. – № 4. – P. 692–698.
30. Torshin Yu.V. Monochannel Propagation Mechanism in Transformer Oil at Low Breakdown Probabilities // Proc. 12th Intern. Conf. on Dielectric Liquids. – Roma. – Italy, July 15–19, 1996. – P. 230–233.
31. Торшин Н.В. К проблеме существования лидерного процесса при импульсном электрическом пробое трансформаторных масел // Электричество. – 1993. – № 5. – С. 4–16.
32. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд: Учебное пособие: Для вузов. – М.: Изд-во МФТИ, 1997. – 320 с.
33. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. – Екатеринбург: УрОРАН, 2000. – 258 с.
34. Ушаков В.Я., Бутенко В.А., Кузнецов Ю.И. Сопоставление электрофизических характеристик импульсного разряда в различных диэлектрических средах // Электронная обработка материалов. – 1970. – № 2. – С. 44–54.

УДК 539.2/6:548.571